

電化鐵路洩漏電流的測試

顏世雄*

Measurement of Leakage Current from Electric Train

Shih-Shong Yen

摘 要

習知由直流電車系統的漏電對地下管道有可能會產生電性腐蝕（電蝕），為防範電蝕首先須對其洩漏電流，洩漏電阻有十分的資訊。這資訊並不可能由理論推導而必須根據實測而來。以往對這些電流或電阻值的測試吾人並無經驗，筆者於本文裡參考國外的經驗與資料加以分析，檢討其可行性，並儘可能列出如要在台灣實測時的可能需要的實際電路與數據供參考。

關鍵詞彙：腐蝕、電車

ABSTRACT

The leakage current from dc electric train to underground metallic conduits might introduce serious corrosion problems. For the purpose of preventing corrosion problems, the leakage impedance from grounded rail to earth should be estimated. This impedance could not get from theoretical calculation. Unfortunately, up to now we have very few experiences of such measurements. In this paper, I will introduce a measuring method proposed in the literature.

Key words: Corrosion、Electric Train

一、緒言

台鐵早已電化，目前台北的捷運系統正在進行中。如從腐蝕的立場來檢討時這兩電車系統是不同的，其主要不同點是前者是“交流電化”而後者是“直流電化”。習知直流電車系統的電氣腐蝕（日本簡稱電蝕）問題是不能忽略的。因為台北捷運系統是台灣的第一條需要面臨電蝕的電車系統，吾人必須利用此寶貴機會建立對策累積

經驗。而為擬對策必須先瞭解會造成電蝕的原因，則吾人必須測試由電車軌道流出，或流入鄰近地下管路的洩漏電流。但對此問題以往台灣並無此經驗，故吾人必須從頭開始研究。惟在國外已有相當成熟的技術，故在研究初期如能參考國外資料並如能充分瞭解而加以應用則可省去很多時間與經費。本文的目的在此，筆者乃由文後的參考文獻裡整理本文，如有助於提昇台灣的有關單位、學者、工程師的參考則幸矣。

*台電電力綜合研究所退休
工業材料研究所特約顧問

二、電化鐵路的分類

從電車鐵路的構造來分類，則可分成如下的幾類(a)普通鐵路(b)高架鐵路(c)地下鐵路(d)懸掛鐵路(e)單軌鐵路及(f)無軌電車等。如從由電力系統的供電來分類，則可分成直流電與交流電的兩大類。當然尚可由頻率再分為60Hz或50Hz，以及由供電電壓的高低來分成幾種不同電壓等級。

早期因交流電車會對鄰近通信線路產生電磁感應干擾，所以不被採用，只用直流電車，但後來此問題解決之後亦漸漸出現交流電車。目前台灣鐵路採用對地電壓25kv的交流輸電系統，台北市捷運電車是採用750v的直流輸電系統。交流與直流兩輸電方式的不同點在電磁感應障礙及由於直流電流的腐蝕問題。

輸電方式可分為(a)架空複線(如圖1-a)兩線均對大地絕緣輸電，以致對大地的洩漏電流低，但卻構造較複雜，比其他方式比較，相對故障亦較多。(b)架空單線(如圖1-b)架空線只一

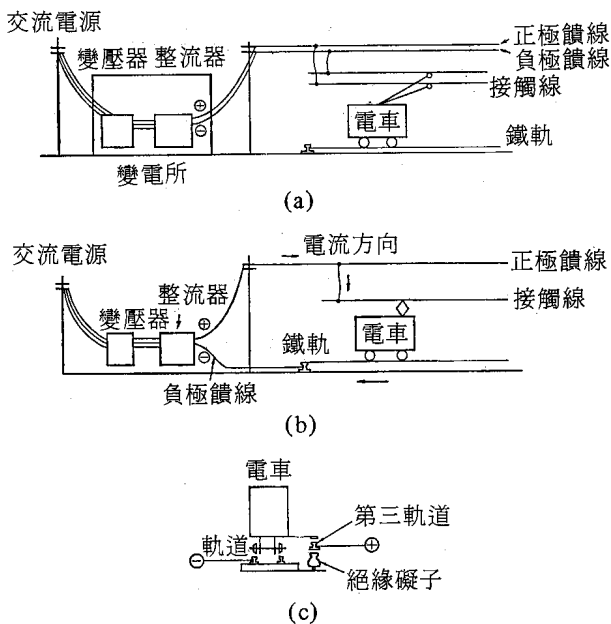


圖 1 輸電方式

Fig.1 Feeding system of electric train.

條，另一條回歸電路使用鐵軌輸電，成本較低，適合於高速運轉用。(c)第三軌道(如圖1-c)等方式。

三、軌道洩漏電流測試^(2,3)

3-1. 試驗目的

本試驗的目的有二，其一是確認包括饋線，電車線及軌道的全部的導體電阻以及電壓降是否符合標準值？根據日本的“有關電氣設備的技術基準第269條(電氣設備有關技術基準第269條)”，此值是2.5v/km以下。其次是藉測試對電蝕有鉅大關係的軌道對地洩漏電阻值來事先發現洩漏電流集中點。

3-2. 試驗方法

試驗分為“軌道電流試驗”即，軌道通電流測試導體電阻試驗。以及“洩漏電流試驗”即，由軌道對大地通電流測試洩漏電阻的試驗兩種。

3-2-1. 軌道電流試驗

基本試驗電路如圖2。通常以兩變電所間為一試驗區間，試驗區間的兩端於阻抗搭接(impedance bond)處的中性線要絕緣，令供試區間對外要絕緣，使其成為一獨立的區間供測試。共設置三測試點，即，電源端，中點以及短路端(日本稱為“本部”，“中間點”及“短路點”)。所謂阻抗搭接處就是為探知該區間有無列車而於左右兩軌道間並聯變壓器，並加AC電源以便當

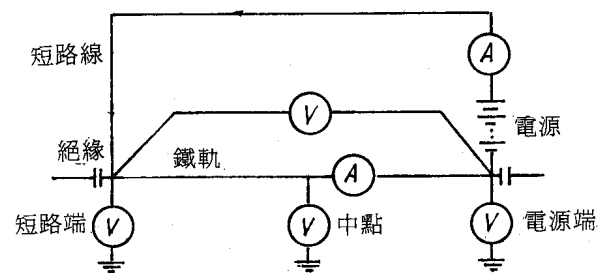


圖 2 軌道電流試驗電路

Fig.2 Rail current measuring circuit.

車輛車軸把絕緣短路時檢知列車存在的電路設置處。如圖 3 所示。

試驗時於電源端變電所的饋線與軌道間串聯直流電源鹼蓄電池，而於短路端將饋線與軌道短路形成通電路。於本試驗需通電流約 100A，在電源端，於中點及短路端各點同時測電壓降，軌道電流及軌道對大地電位。因為所有通電部份已由大地絕緣，故由各測試可求得導體的電壓降以及由此計算導體電阻，並確認整體電路的導通良好。

設於 a、b 兩端測得對大地的電壓為 V_a 與 V_b 時，a b 間導體的電壓降 V_{ab} 為

$$V_{ab} = V_b - V_a \quad (1)$$

$$\text{導體電阻} = V_{ab}/i = (V_b - V_a)/i \quad (2)$$

式中：i——軌道電流

3-2-2. 洩漏電流試驗

基本試驗電路如圖 4。試驗區間的中間點要絕緣成兩斷路部份之後通電，則可測到對大地的洩漏電流，故可由此求得對大地的洩漏電阻。測試電壓在 60v 以下，通試驗電流 10A 以下測試。由圖可看出所加電流全部洩漏出去，因此電壓除

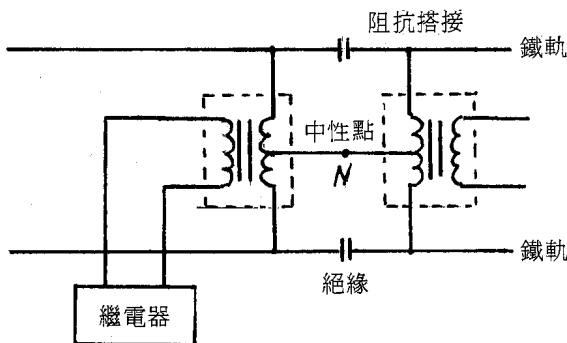


圖 3 阻抗搭接電路[3]

Fig.3 Impedance bonding circuit.

以電流 V_a/I_1 ，則為 ac 間的洩漏電阻， V_a/I_1 ，為 bc 間的洩漏電阻。

3-2-3. 加試驗電流方法

因為試驗電源使用蓄電池，為避免通電流中消耗電能致使電流值衰減以及受到外來的干擾的影響，而通常以約 2sec 的間隔通脈波狀電流如圖 5 所示。

3-2-4. 複線時的試驗方法

試驗電路如圖 6。複線指饋線與軌道來回兩線。而圖中的 (mV) 是測軌道 8m 間的電壓降之意，由此可求出純軌道本身的電阻。又圖中使用的電話線是利用沒通電的電話線做測試的輔助用導體，當然其他線亦可借用。

四、理論

4-1. 軌道電流試驗

於如圖 7 的標準化鐵路系統，設試驗區間總

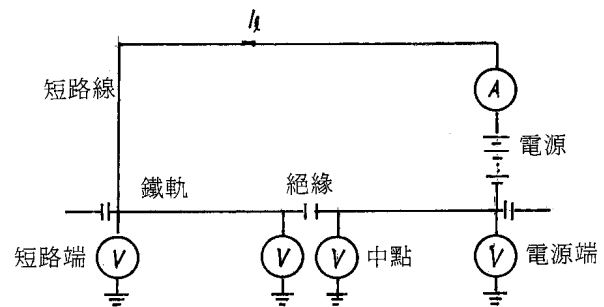


圖 4 洩漏電流試驗電路

Fig.4 Leakage current measuring circuit.

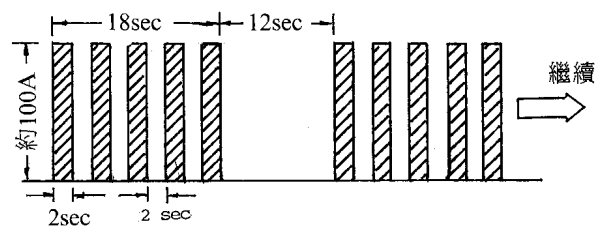


圖 5 通電電流波形

Fig.5 Wave shape of applied test current.

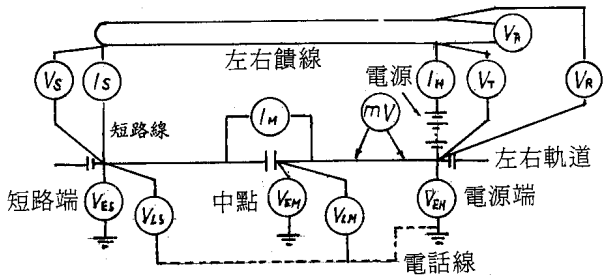


圖 6(a) 軌道電流試驗電路 (複線時)
Fig.6(a) Mail current measuring circuit (two tracks).

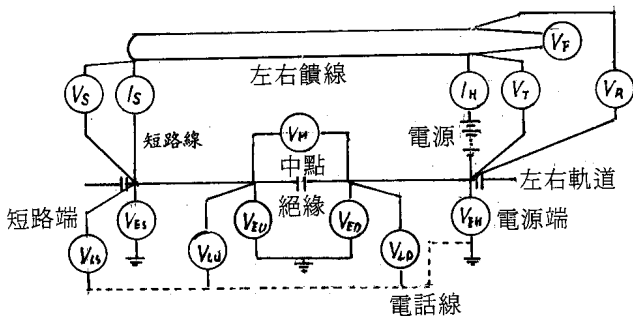


圖 6(b) 洩漏電流試驗電路 (複線時)
Fig.6(b) Leakage current measuring circuit (two tracks).

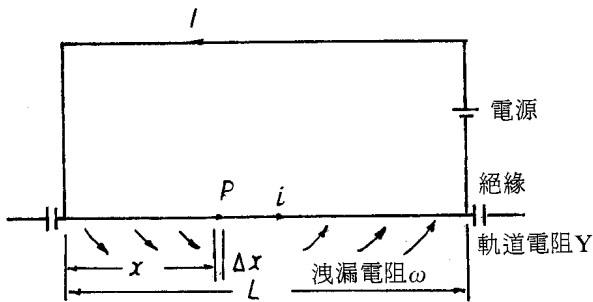


圖 7 標準化的鐵路系統軌道電流試驗
Fig.7 Standardized rail current measurement.

長為 L km，鐵軌電阻為 $r\Omega/\text{km}$ ，鐵軌對大地洩漏電阻是 $\omega\Omega\text{-km}$ ，且通電流 I 做軌道電流試驗時軌道電位（以無限遠處電位為 0 基準電位） v 與軌道電流 i 之間的關係如下式。

$$\frac{dv}{dx} = -ir \quad (3)$$

$$\frac{di}{dx} = -\frac{v}{\omega} \quad (4)$$

式中： x ——由 A 點算起的距離

由(3)及(4)式可得

$$\frac{d^2i}{dx^2} - \frac{ri}{\omega} = 0 \quad (5)$$

於 A 端（開始洩漏之前）的電流是 I ，於 B 端（洩漏電流流回後）電流亦是 I ，則以 $i(x=0) = i(x=L) = I$ 的境界條件解(5)式可得軌道電流 i_x 為

$$i_x = I \{ \sinh\alpha(L-x) + \sinh\alpha x \} / \sinh\alpha L \quad (6)$$

式中： $\alpha = \sqrt{r/\omega}$

試驗區間的軌道電流平均值 i_{Av} 為

$$i_{Av} = \frac{\int_0^L i_x dx}{L} = \frac{2I(\cosh\alpha L - 1)}{\alpha L \sinh\alpha L} \quad (7)$$

又由(4)式可得

$$v_x = -\omega \frac{di}{dx} = \frac{\gamma I \{ \cosh\alpha(L-x) - \cosh\alpha x \}}{\sinh\alpha L} \gamma \quad (8)$$

式中： $\gamma = \omega\alpha = \sqrt{r\omega}$

如鐵軌的 r 與 ω 值都是均勻值時，軌道電流試驗結果的軌道電流以及對大地的電位分佈如圖 8。於本圖，是假定所通軌道電流 I 是 100A，試驗區間全長 L 是 10km，而單位長度軌道電阻 r 為 $0.02\Omega/\text{km}$ （參考表 1，等於 $20\mu\Omega/\text{m}$ ），改變單位距離的洩漏電阻 ω 值如 $\omega = 1\Omega\text{-km}$ ， $\omega = 5\Omega\text{-km}$ 以及 $\omega = 10\Omega\text{-km}$ （參考表 2，近似對碎石的洩漏電阻值）時的軌道電流以及對大地的電位分佈情況。由本圖可看出 ω 愈低（愈容易漏電時）

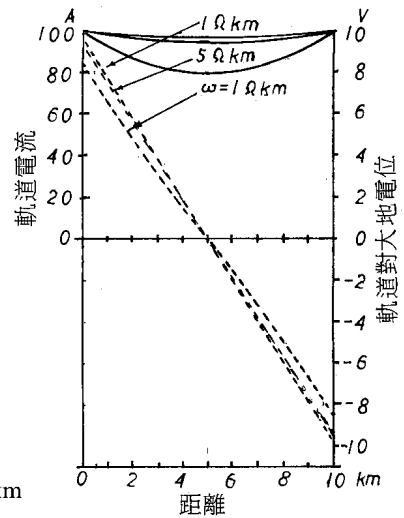
表 1[2]
Table 1[2]

洩漏電阻 \ 區間長L	5km	10	15
1Ω-km	0.332	0.328	0.321
5	0.333	0.332	0.331
10	0.333	0.333	0.332
100	0.333	0.333	0.333

本表以 $R=0.02\Omega / km$ 計算

註：

(軌道電流—於中點的)
平均值 軌道電流
(通電全域—於中點的)
全電流 軌道電流
計算值



圖中： $I = 100A$
 $L = 10km$
 $r = 0.02\Omega/km$

圖 8 標準化的鐵路系統軌道電流試驗計算例
Fig.8 Examples of rail current calculation.

表 2[4]
Table 2[4]

軌道的種類	kg / m	30	37	40N	50N	60
單位長度軌道電阻	$\mu\Omega / m$	49.9	41.1	37.7	31.6	27.1
包括搭接等的單線單位長度電阻		0.033	0.027	0.025	0.020	0.017
(實用值) Ω / cm		0.027	0.022	0.020	0.017	0.015
相當於該軌道 (單線) 電阻的電線數		*2	3	3	4	4
相當於該軌道 (複線) 電阻的電線數		*4	5	6	7	8

註：*325 mm² 鋁線的電阻為0.056Ω / km計算

鐵軌各點對大地的電位愈低。

4.2. 洩漏電流試驗

於如圖 9 的標準化鐵路系統，如前面，設試驗區間總長為Lkm，鐵軌電阻為 $r\Omega/km$ ，鐵軌對大地洩漏電阻是亦 $\omega\Omega-km$ ，且通電流 I_1 做軌道洩漏試驗時，軌道對大地電位 V 與軌道電流 i 之間的關係亦是如(3)及(4)式。

於AN間，以 $i_{(x=0)}=I_1$ ， $i_{(x=L/2)}=0$ 的境界條件解(5)式可得於任一點Q的軌道電流 i_x 為

$$i_x = I_1 \sinh\{\alpha(L/2 - x)\} / \sinh(\alpha L/2) \quad (9)$$

於Q點的鐵軌對大地電位 V_x 為

$$v_x = \gamma I_1 \cosh\{\alpha(L/2 - x)\} / \sinh(\alpha L/2) \quad (10)$$

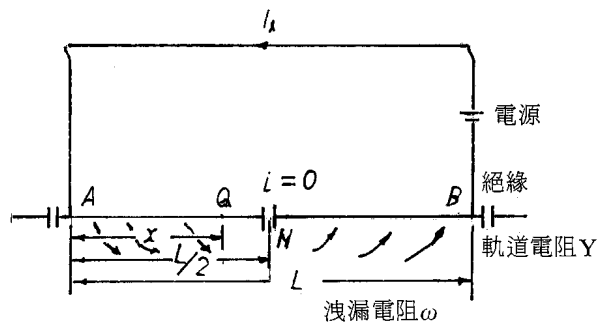


圖 9 標準化的鐵路系統軌道洩漏電流試驗
Fig.9 Standardized leakage current measurement.

於NB間軌道電流 i_x 及鐵軌對大地電位 V_x 為

$$i_x = I_1 \sinh\{\alpha(x - L/2)\} / \sinh(\alpha L/2) \quad (11)$$

$$v_x = -\gamma I_1 \cosh\{\alpha(x-L/2)\} / \sinh(\alpha L/2) \quad (12)$$

由(9)、(10)、(11)及(12)式可得分佈圖例圖10。

於洩漏電流試驗時，於AN間為例，鐵軌對大地電位的平均值 V_{Av} 為

$$\begin{aligned} V_{Av} &= \frac{\int_0^{L/2} v_x dx}{L/2} \\ &= \frac{\int_0^{L/2} [\gamma I_1 \cosh\{\alpha(L/2-x)\} / \sinh(\alpha L/2)] dx}{L/2} \\ &= \frac{2\gamma I_1}{\alpha L} \end{aligned} \quad (13)$$

於此區間的鐵軌對大地的電阻值 R_t 為

$$R_t = V_{Av} / I_1 = 2\gamma / \alpha L = \omega / (L/2) \quad (14)$$

由(14)式此可知由洩漏電流試驗所得鐵軌對大地平均電位與通電電流則可求此區間的洩漏電阻 ω 。NB間亦同。

於實地試驗時，鐵軌對大地電位及軌道電流值要使用在各測試點的實測值，而需由實測值計

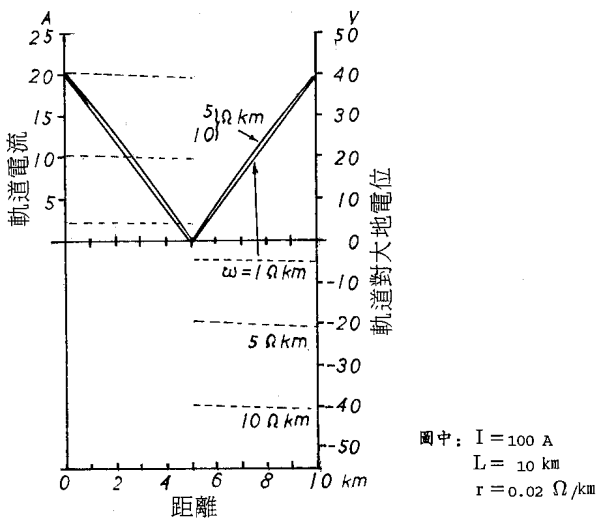


圖 10 標準化的鐵路系統軌道洩漏流試驗計算例
 Fig.10 Examples of leakage current calculation.

算軌道電流平均值及洩漏電阻。

如根據(6)、(7)兩式求(軌道電流平均值-於中點的軌道電流) / (通電全電流於中點的軌道電流)時可得如表 1 的計算例。由此試算結果可看出軌道電流平均值約等於通電全域全電流值與於中點的軌道電流值的約1/3處的電流值。

由圖10可知軌道對大地電位分佈幾呈線性，故於試驗時可將應用在電源端，短路端以及中點所測到的軌道對大地電位的平均值套用(14)式求出鐵軌洩漏電阻 R_t 。

4.3. 回流電路電壓降計算

根著電車的運轉其回流電路亦會產生電壓降。亦會因此鐵軌對大地電壓發生洩漏電流，引起對鄰近金屬體的電蝕現象。然而此電壓降卻時時刻刻在變，因此雖有需要訂出限制值，但不能以瞬間值來限制。日本的“電氣設備技術基準第269條第1項第3號”則鑑於電車負載是移動性負載，故規定是針對電车的平均負載電流在全區間平均分佈時的電壓降訂出限制值。根據該基準的計算法如下：

設回流電路的導體電阻為 $r \text{ } \Omega/\text{cm}$ ，AB間的距離為 $L \text{ km}$ 且平均負載電流 $i_0 \text{ A/km}$ 時，於圖11，回流電路的微小部分 Δx 的電壓降為 Δv ，則

$$\Delta v = i_0 x r \Delta x \quad (15)$$

區間AB間的電壓降 V 為

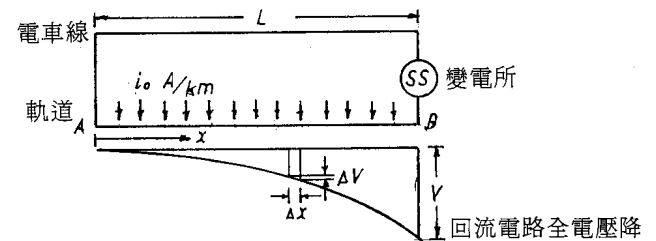


圖 11 以平均負載電流計算的回流電路電壓降
 Fig.11 Calculated voltage drop in terms of load current.

$$V = \int_0^L dv = \int_0^L i_0 x r dx = i_0 r L^2 / 2 \quad (16)$$

單位長度的回流電路電壓降 v 為

$$v = V/L = i_0 r L / 2 \quad (17)$$

日本的該基準規定 $V \leq 15V$ ， $v \leq 2.5v$

如於某一區域裡如圖12電車運轉次數不平均時（圖12例是分成4段，每段列車數不同），先求各段內的平均負載電流，例如為 i_{AB} 與 i_{BC} ，則AC間的回流電路電壓降 V_{AC} 的計算如下：

$$V_{AC} = i_{AB} r L_{AB}^2 / 2 + i_{BC} r L_{BC}^2 / 2 + i_{AB} L_{AB} r L_{BC} / 2 \quad (18)$$

(18)式的第3項是AB間的負載電流流經BC間的電壓降。

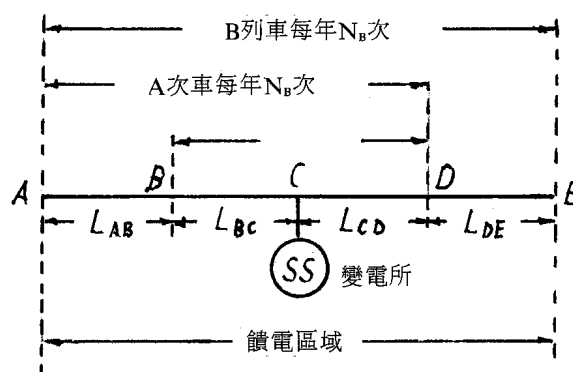


圖 12 回流電路的分段

Fig.12 Segmentation method of return current circuit.

五、參考數據

5.1. 軌道電阻例

如表 2

5.2. 洩漏電阻例

根據[4]，日本鐵路的洩漏電阻例如表 3，如台灣亦需要測試時，此類數據可做參考。

表 3(a)[4]

Table 3(a)[4]

	新幹線	日本 JR 線		地下鐵	併用軌道
		在來線	新線		
範圍	200~Ω-km	0.4~6.4	8~425	0.08~37	0.05~0.2
代表值		10		10	0.1

表 3(b)[4]

Table 3(b)[4]

	資料數	最大值	最小值	單純平均	全區加權平均	備註
(全數)	158件	83.9	1.2	8.3	8.4Ω-km	# 1
碎石道床(晴,陰)	132	83.9	1.2	9.3	9.4	
(雨,雪)	26	8.9	1.5	3.2	3.2	# 2
水泥道床(全數)	76	12 400	4.1	450.7	285.2	
(晴,陰)	58	12 400	5.9	581.7	375.5	# 3
水泥道床(晴,陰)	36	2 727	5.9	144.0	179.7	
(雨,雪)	18	227	4.1	28.7	43.7	# 4
水泥道床(雨,雪)	12	12.5	4.1	8.0	8.3	
局部與接地有關聯	4	0.9	0.34	0.6	---	

註：# 1—去除局部接地的關聯

2—去除與碎石道床的關聯

3—試驗區間2km以上

4—去除直接軌道的關聯

資料件數是以每一試驗區間算1件

加權計算法是 Σ (洩漏電阻 \times 區間距離)

六、結言

台北的捷運系統是直流電車系統，而在國內是第一條，以往都無經驗，因此如不好好檢討防蝕工程則恐會產生許多後遺症。需要檢討的項目之一就是軌道阻抗以及洩漏電阻等項。

除了為工程上，學問上的興趣之外，萬一將來鄰近管道發生腐蝕現象時，是否由於電車的電蝕？的責任認定時亦需要實地測試的基楚資料做依據。洩漏電流，洩漏電阻等數據就是其中的兩項。

本文資料主要是參考日本的資料，世界上日本在電車工程方面是處於數一數二的國家，頗多地方值得吾人的參考。而經檢討之後，相信台灣

在測試設備以及測試技術都沒問題的。願台灣亦早日有自己的測試報告問世。並有助於電車工程技術的開展，以及對各種地下鐵件的防蝕工程有所貢獻。

參考文獻

1. 日本電氣學會電蝕防止研究委員會“電蝕，土壤腐蝕Hand Book”電氣學會（日文）(1997)
2. 田中 裕，出野市郎“電化工事竣工に伴う軌條漏洩電流試驗（その3）”日本鐵路技術研究所鐵路技術研究速報No. A-87-147(Mar. 1987)5
3. “電蝕防止對策の手びき”東京電蝕防止對策委員會(Jan. 1986)
4. 田中 裕工業技術研究院演講稿(1993)